

文章编号 1004-924X(2002)02-0139-04

离轴凸非球面的 Hindle 检测

王 鹏, 赵文才, 胡明勇, 张海洪, 郝沛明

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要:采用 Hindle 球方法检测凸非球面是人们常用的经典方法之一,此方法的优点是检验精度高、操作简单。为了解决经典 Hindle 球检验离轴凸非球面所需的 Hindle 球口径过大的问题,提出采用离轴 Hindle 球检验离轴凸非球面的方法。此方法中,Hindle 球使用在离轴状态,通过旋转离轴凸非球面达到检验整个待检面的目的。此方法可以大大减小 Hindle 球的尺寸,从而间接增大了待检离轴凸非球面的尺寸。本文同时对此方法的测量精度进行了理论分析。

关键词:非球面检验;离轴;Hindle 球检验

中图分类号:TH703 **文献标识码:**A

1 引 言

非球面在现代光学仪器中的应用越来越广泛,特别是高质量的变焦距系统、空间相机等必须采用非球面^[1]。随着设计手段和加工仪器的性能越来越强大,大口径非球面的检测是限制其使用的瓶颈。目前,大口径非球面的检测最主要是采用 Null 透镜检测、Hindle 球检测和计算全息片(CGH)检测三种方法。

Null 透镜检测是最常用的检测非球面方法。此方法首先通过光学设计来设计一个非球面的补偿系统,补偿系统产生的波前与理想非球面产生的波前一致,通过检测理想波前与非球面反射波前的位相差来检测非球面。Null 透镜检测主要是用于检测凹非球面,同时它对系统的装配公差要求十分严格^[2-5]。

计算全息片检测非球面是新近发展起来的检测方法,计算全息片之所以可以用于非球面检测,是因为计算全息片可以将入射波前衍射成设想的波前和位相分布,此时的干涉检测就是检测待检面(非球面)的波前与参考面波前(计算全息的衍射波面)的波差。早期的计算全息片都是在平面基片上制作全息条纹,近来美国 Arizona 大学的 J. H. Burge 通过在曲面基片上制作全息条纹来检测凸非球面,这样计算全息片就可以检测大口径、

大矢高的凸非球面。计算全息片检测非球面具有检测方法简单、准确的特点,它的检测精度主要是受到计算全息片制作精度的影响,同时全息条纹也很容易受到外界条件的影响^[6]。

在所有非球面的检测方法中,Hindle 球检测是最早、最经典的,同时也是可靠性最高的检测方法,Hindle 球主要用于检测凸非球面,具有检测精度高,装调简单等优点,但缺点是当检测大口径凸非球面时,就需要更大口径的 Hindle 球,这就造成了材料和工艺上的难度。为了解决 Hindle 球口径过大的问题,Noble 等人曾提出采用串接两个 Hindle 球的方法,沿着光轴的方向放置两个中心通光孔径不同的 Hindle 球,但 Noble 等人并没有给出两个 Hindle 球的方程^[7,9]。为了解决此问题,Percino - Zacarias 等人给出了两个 Hindle 球的关系方程,并将两个 Hindle 球推广到多个 Hindle 球串接的普遍形式^[8]。虽然采用串接的方法可以减小 Hindle 球的尺寸,但是对于离轴凸非球面的检测,串接的方法并不一定有效,因为串接的 Hindle 与待检非球面共轴,对于非球面边缘的检测同样需要大口径的 Hindle 球或者是多个 Hindle 球串接,这样就造成加工和装调的困难。

针对离轴凸非球面检测的特殊性,作者采用离轴 Hindle 球,对凸双曲非球面进行检测。此方法可以大大地减小 Hindle 球的尺寸,同时增加了检测精度。

2 检测方法

本文需要检测的凸双曲非球面参数为 $R = 910.90364\text{mm}$, $k = -4.83644$, 口径为 $\phi = 174 \times 113\text{mm}$, 凸非球面的偏心为 72mm 。如图 1 所示。

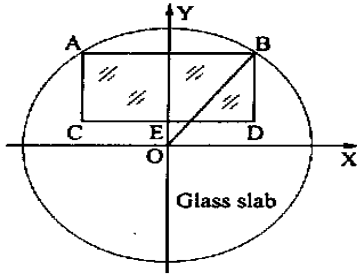


图 1 加工拼盘示意图

Fig. 1 Diagrammatic sketch of a glass slab.

图中, ABCD 为需要加工的工件, 其余部分为拼盘。

因为需要检测反射面的凸双曲非球面, 如果从其背面凹面为会聚反射面, 用 Null 补偿镜去检测, 则对凹反射面后面的镜面厚度的加工精度要求十分苛刻, 如果加工时镜头的厚度稍有变化, Null 补偿镜将完全失效。从国际上检测非球面的通用观点来看, 凸反射非球面并不适合用其背面凹反射面去检测。而现有用 Hindle 球检测凸非球面的方法中, Hindle 球均与待检非球面同轴, 为了检测整个非球面, 则需要更大口径的 Hindle 球。如果待检非球面本身的口径就比较大, 由于材料和工艺的因素, 就能造成 Hindle 球检测方案的失败。所以作者对经典的 Hindle 球检测凸非球面方法做了修改, 离轴使用 Hindle 球, 则可以大大地减少 Hindle 球的尺寸。

图 2 为系统光路图, Hindle 球的球心与待检非球面的第二个焦点重合。

由非球面方程

$$x = \frac{cy^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2y^2}}, \quad (1)$$

得两个焦点之间的距离为

$$f_{1,2} = \frac{-\sqrt{-k} \pm 1}{(1+k)c}, \quad (2)$$

即 $f_1 = -759.59$, $f_2 = 284.73$ 。为了保证刀口在

F_1 处能横向切入和检测到凸双曲非球面上子午方向的所有面积, 则 Hindle 球的半径允许最大半径

$$r_{\max} = -f_1 + f_2 + d, \quad (3)$$

最小半径

$$r_{\min} = f_2 - l_1, \quad (4)$$

其中, d 为 Hindle 球的边缘厚度, 取 -130mm 。则通过数学运算, 可以得到 Hindle 球的允许最大半径 $r_{\max} = 914.32\text{mm}$ 和最小半径 $r_{\min} = 821.39\text{mm}$, 故取 Hindle 球的半径为 $R_{\text{Hindle}} = 900\text{mm}$, 由简单的三角关系可得出此时 Hindle 球的口径为 $S = 413.62\text{mm}$ 。

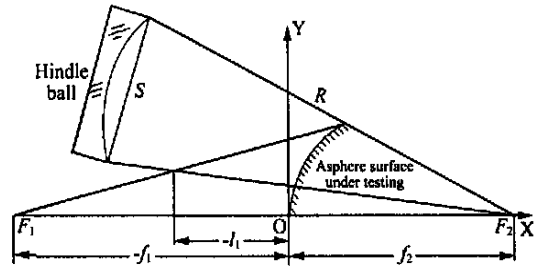


图 2 光学系统在子午方向的光路图

Fig. 2 Sketch map of the optical system in tangential direction.

以上的讨论都是在子午方向上讨论, 但它只能检测到子午方向上的全口径, 此时检测到的面积如图 3A 中斜线所示。为了增大检测面积, 即弧矢方向上能检测到非球面镜的上边缘点 B, 则需要重新计算 Hindle 球的口径。

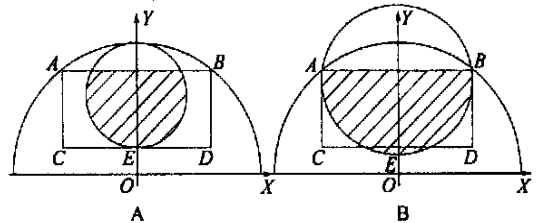


图 3 不同情况下能检测到的面积

Fig. 3 The tested areas under different conditions.

计算 Hindle 球弧矢方向上的全口径与计算子午方向上的全口径的方法完全一致。但需要注意的是为了保证检测到工件的 B 点和 E 点, 同时 Hindle 球的最低点并不遮挡待检非球面的定点光线, 通过计算得到 Hindle 球弧矢方向上需要的全

口径为 554.93mm。

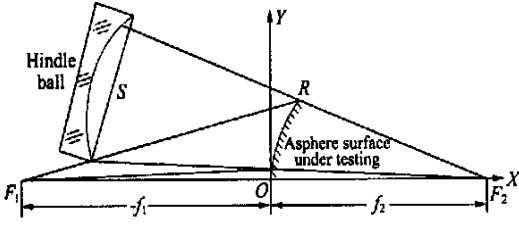


图 4 光学系统在弧矢方向的光路图

Fig. 4 The path sketch of the optical system in sagittal direction.

因此 Hindle 球的最后全口径取为 600mm,此时检测到的非球面的面积如图 3B 斜线部分所示。可以发现,离轴使用 Hindle 球检测离轴非球面并不能检测到全部的工件口径。这可以通过转动非球面来检测 Hindle 球反射光线检测不到的部分,从而检测到整个非球面。也可以进一步增大 Hindle 球的尺寸和增大对离轴凸非球面的检测面积。

如果采用经典的共轴 Hindle 球法检测此离轴凸双曲非球面,当 Hindle 球的半径取 900mm 时,Hindle 球最小需要口径为 891.47mm。可见此方法可以大大减少 Hindle 球的口径,从而使加工变得容易。

3 误差分析

本文中所采用方法的加工与检测精度取决于 Hindle 球的面形精度和检测时各个元件的位置摆放精度。当认为 Hindle 球的面形精度已经达到了检测要求时,加工与检测精度主要取决于刀口的位置精度。由几何光学知

$$\frac{1}{f_2} - \frac{1}{f_1} = \frac{2}{R}, \tag{5}$$

等式两边微分得

$$dR = \frac{-2f_2^2}{(f_1 - f_2)^2} df_1, \tag{6}$$

其中 R 为待检非球面顶点的曲率半径, df_1 为刀口位置的微量移动, dR 为由于刀口位置的微量移动而引起的待检非球面顶点曲率半径的偏差。由 (6) 式知待检非球面顶点曲率半径的检测误差与非球面前后焦点的位置、刀口位置的微量移动量有关。

又由参考文献 [8] 知非球面的二次常数的表达式 (几何光学范畴) 为

$$K = -1 - \frac{2}{(1 -)^2}, \tag{7}$$

其中 K 为二次曲线常数, 为待检非球面与 Hindle 球半口径高度之比, 为非球面近轴垂轴放大率,等式两边微分得

$$dK = \frac{4 f_1}{(1 -) f_2^2} df_1, \tag{8}$$

可见非球面二次曲线常数的测量精度取决于两个曲面半口径高度之比、非球面前后焦点的位置、刀口位置的精度,关系如图 5 所示。

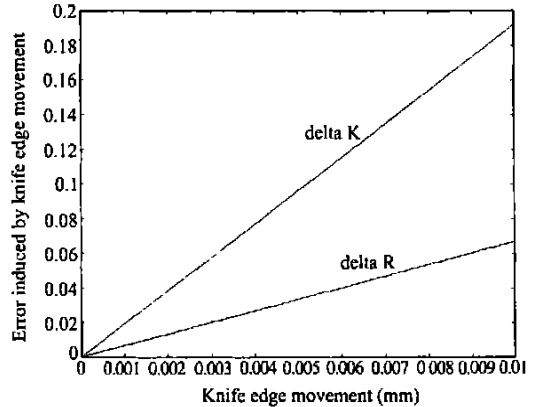


图 5 由刀口边缘移动引起的误差

Fig. 5 Error induced by knife edge movement.

4 结 论

本文采用离轴 Hindle 球检测离轴大口径凸非球面。此方法可以大大减少经典共轴 Hindle 球法 Hindle 球所需的尺寸,降低了 Hindle 球加工的难度。本方法为离轴大口径凸非球面的检测探索出一条新路。

参考文献:

- [1] Betensky E. The role of asphere in zoom lens design[J]. *SPIE*, 1990, 1354:656 - 662.
- [2] Offner A, Malacara D. *Null tests using compensators in Optical shop testing (2nd ed)* [M]. Wiley, New York: D. Malacara, ed, 1992: 427 - 454.
- [3] Bruns D G. Null test for hyperbolic convex mirrors[J]. *Appl. Opt*, 1983, 22: 12 - 13.
- [4] Szulc A. Null testing convex optical surfaces[J]. *Appl. Opt*, 1997, 36(25): 6274 - 6277.
- [5] Burge J H. Applications of computer-generated holograms for interferometric measurement of large aspheric optics[A]. *Proc SPIE*[C], 1995, 2576:258 - 269.
- [6] Noble R, Malacara D, Cornejo A. Multistep Hindle test[J]. *Appl. Opt*, 1974, 13:2476 - 2477.
- [7] Percino-Zacarias Maria E. N-Hindle-sphere arrangement with an exact ray trace for testing hyperboloid convex mirrors[J]. *Appl. Opt*, 1999, 38(28):6050 - 6054.
- [8] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检测[M]. 北京:科学出版社,1994. 10 - 28.
- [9] 宋朝辉,吴清文,卢铿. 非球面长圆状反射镜支撑结构的工程分析[J]. *光学 精密工程*, 1999, 7(6):56 - 60.

Hindle testing of the off - axis convex ashpere surface

WANG Peng, ZHAO Wen-cai, HU Ming-yong, ZHANG Hai-hong, HAO Pei-ming

(*State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China*)

Abstract: Hindle testing of the convex aspherical surface is one of the classical methods, which has the advantages of high accuracy and easy operation. In order to avoid the large aperture of Hindle ball when an off-axis convex aspherical surface is under testing, the authors suggest that it be done with off-axis Hindle ball. Hindle ball is used in off-axis configuration, at the same time it can be rotated so that the whole area can be tested. The size of Hindle ball can be reduced, thus the area in the aspherical surface to be tested is increased. The accuracy of the method is also analyzed theoretically.

Key words: aspherical surface testing; off - axis; Hindle testing

作者简介:王 鹏(1969 -),男,吉林省长春市人,博士,现在在长春光学精密机械与物理研究所做博士后研究工作,研究方向为光学设计、光学检测、光学加工、衍射理论等。